АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 41, № 2, с. 216 - 222

УДК 551.463

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННÓЙ И КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ГЛУБОКОМ ОКЕАНЕ

© 1995 г. О. П. Галкин, С. Д. Панкова

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 11.03.94 г.

Приводятся данные натурных экспериментов по изучению временнóй и корреляционной структуры звуковых полей, проведенных в различных глубоководных районах Мирового океана. Использовалось псевдошумовое излучение в диапазоне частот от 0.5 до 4 кГц. Рабочие дистанции составляли от 50 до 700 км. Прием осуществлялся с помощью остронаправленных в вертикальной плоскости систем. Применение двух направленных приемных антенн позволило реализовать одновременный разнесенный по глубине (до 1200 м) прием сигналов. Исследовались временны́е и корреляционные характеристики сигналов, пришедших чисто водным путем и с отражением от взволнованной поверхности океана.

При распространении звуковых волн в океаническом волноводе происходит поглощение и рассеяние звука на неоднородностях водной толщи и на дне, а также – рассеяние на взволнованной поверхности океана. В результате изменяются спектральные характеристики излучаемых сигналов. Поэтому представляют определенный интерес экспериментально полученные данные о взаимной корреляции относительно широкополосных сигналов, пришедших в точку приема по различным лучам (как водным, так и отраженным от поверхности). Эти данные позволяют судить не только об искажении сигналов при дальнем распространении, но и оценить статистические характеристики временнóй структуры акустических полей при многолучевом распространении звука.

Статистическая обработка большого числа экспериментальных данных, полученных авторами при исследовании звуковых полей в различных районах Мирового океана, позволяет сделать определенные выводы о стабильности временных спектров звуковых полей. Временной спектр, под которым понимается совокупность разностей времен прихода одного и того же сигнала в точку приема по различным лучам в вертикальной плоскости, измерялся корреляционным методом. Поэтому при изучении статистических характеристик временны́х спектров, одновременно получены величины и флуктуации коэффициентов взаимной корреляции между указанными сигналами.

Экспериментальные исследования структуры звуковых полей на дистанциях от 50 до 700 км в диапазоне частот от 0.5 до 4.0 кГц проводились во многих районах Мирового океана. Сюда следует отнести Западно-Австралийскую и Центральную котловины в Индийском океане, район Марианской впадины и Курило-Камчатского желоба в Тихом океане, Бразильский район, районы Лабрадорского течения и течения Гольфстрим, Канарских островов, Гвианской котловины, а также район вблизи подводной горы Жозефин в Атлантическом океане.

Глубины в упомянутых районах менялись от 3600 до 6100 м.

Эксперименты проводились с использованием дрейфующих судов, с одного из которых ненаправленным источником излучался непрерывный псевдошумовой сигнал, принимавшийся на другом судне. Для излучения и приема сигналов в разные годы использовались научно-исследовательские суда "Петр Лебедев" и "Сергей Вавилов" или "Академик Борис Константинов" и "Академик Николай Андреев". Расстояние между излучающим и приемным судами обычно соответствовало 1-й, 2-й или последующим зонам конвергенции. При увеличении дистанции между судами полоса излучаемого сигнала обычно сужалась для обеспечения в точке приема необходимого отношения сигнал/помеха. Распространяющиеся разными путями сигналы принимались одной или двумя антеннами, обеспечивавшими направленный прием в вертикальной плоскости. На глубинах приема до 600 м применялась неэквидистантная 40-метровая вертикальная антенна, состоящая из одиночных приемников с 74-мя фазовыми центрами. На бóльших глубинах (до 1500 м) использовалась 10-метровая глубоководная антенна с 26-ю фазовыми центрами. Расположение фазовых центров по ее длине было аналогичным

расположению их в средней части 40-метровой антенны. Пространственное разрешение сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости определялось шириной диаграммы направленности приемных антенн и составляло ~2° для 40-метровой и ~7.5° для 10-метровой антенны на средней частоте 1 кГц. Диаграммы направленности формировались двумя способами. Аналоговый способ обеспечивал как режим электрического сканирования всего рабочего сектора углов (±23° от горизонта) тремя диаграммами направленности, так и режим наведения их на выбранные углы. Таким образом, имелась возможность одновременной регистрации угловой структуры поля (один тракт – в режиме сканирования) и двух непрерывно поступающих сигналов, пришедших с выбранных направлений (два тракта – в режиме наведения). Цифровым способом создавался статический веер, состоящий из 32-х диаграмм направленности, позволяющий одновременно регистрировать как угловую структуру поля в точке приема (с меньшей точностью, чем при аналоговом способе), так и сигналы, приходящие одновременно с восьми направлений в вертикальной плоскости.

Для получения достоверных данных о структуре и стабильности временны́х спектров регистрация сигналов проводилась за время наблюдения до 40 - 50 мин. За это время, естественно, дистанция между дрейфующими судами не должна была заметным образом изменяться. Поэтому необходимо было обеспечить практически непрерывное измерение дистанции между точками излучения и приема сигналов. В описываемых экспериментах дистанция измерялась гидроакустическим методом [1] по времени распространения коротких тональных импульсов, подмешанных к излучаемому непрерывному псевдошумовому сигналу. Импульсы длительностью до 50 мс и с частотой заполнения 1 или 2 кГц излучались обычно один раз в минуту. Использование системы единого времени на излучающем и приемном судах, а также специальной системы обработки принятых импульсов позволило измерять дистанцию между излучателем и приемной антенной с точностью до нескольких метров.

Для определения временны́х спектров принимаемых сигналов вычислялись функции взаимной корреляции между сигналами, одновременно принятыми диаграммами направленности, наведенными на разные углы в вертикальной плоскости.

Длина реализации (1.024 с) и частота квантования (8 кГц) каждого из вводимых в ЭВМ сигналов выбирались исходя из рабочей полосы частот и возможностей ЭВМ для получения взаимнокорреляционной функции с необходимой точностью (0.01). Вычисления проводились через каждые 8, 16 или 30 с. Поскольку типичный период поверхностного волнения близок к 10 с, измеренные значения, в том числе и для сигналов, отразившихся от поверхности, можно было считать статистически независимыми.

При измерении взаимной корреляции между сигналами, принятыми различными диаграммами направленности антенн, даже при весьма хорошем пространственном разрешении их по углу прихода, возможно попадание в любую из диаграмм нескольких сигналов с различными временами распространения. Если разность времен распространения оказывалась больше интервала корреляции излученной посылки, то такие сигналы при корреляционной обработке успешно разрешались во времени. В результате в функциях взаимной корреляции появлялся не один, а несколько корреляционных максимумов, соответствующих нескольким составляющим во временно́м спектре. При экспериментах в 1-й и 2-й зонах конвергенции в большинстве случаев излучался сигнал с полосой частот 0.5 - 4.0 кГц, соответствующей разрешению по времени ~0.3 мс. На больших дистанциях, где уровень полезного сигнала уменьшался, приходилось работать в более узкой полосе частот 0.8 - 1.5 кГц, что соответствовало разрешению по времени ~1.4 мс. С увеличением дистанции, как правило, увеличивается и число лучей, соединяющих точки излучения и приема. При этом возможность выделения отдельных лучей в ряде случаев становится проблематичной. Будем в дальнейшем называть "многолучевым" приемом прием нескольких сигналов, близких по углу прихода и неразрешаемых диаграммой направленности. Прием, при котором в диаграмму направленности антенны сигнал приходит по одному лучу, будем называть "однолучевым". Таким образом, при однолучевом приеме антенна практически полностью разрешает лучи в пространстве, в отличие от неполного разрешения их при многолучевом приеме.

Известно, что флуктуации сигналов, распространяющихся чисто водным путем, т.е. не претерпевших отражений ни от поверхности, ни от дна, обусловлены, в первую очередь, имеющимися в водной среде неоднородностями. Оценку (сверху) влияния неоднородностей показателя преломления на флуктуации времени распространения сигнала по лучу можно получить по формуле [2]:

$$\sigma_\tau = \left(\frac{\pi^{1/2}}{2c^2}\langle\mu^2\rangle ar\right)^{1/2},$$

где $\langle\mu^2\rangle$ – средний квадрат флуктуаций показателя преломления, a – средний размер случайных неоднородностей, c – скорость звука, r – расстояние.

Расчет по приведенной формуле в предположении, что все пространство заполнено неоднородностями, дает на дистанциях до 500 км величину

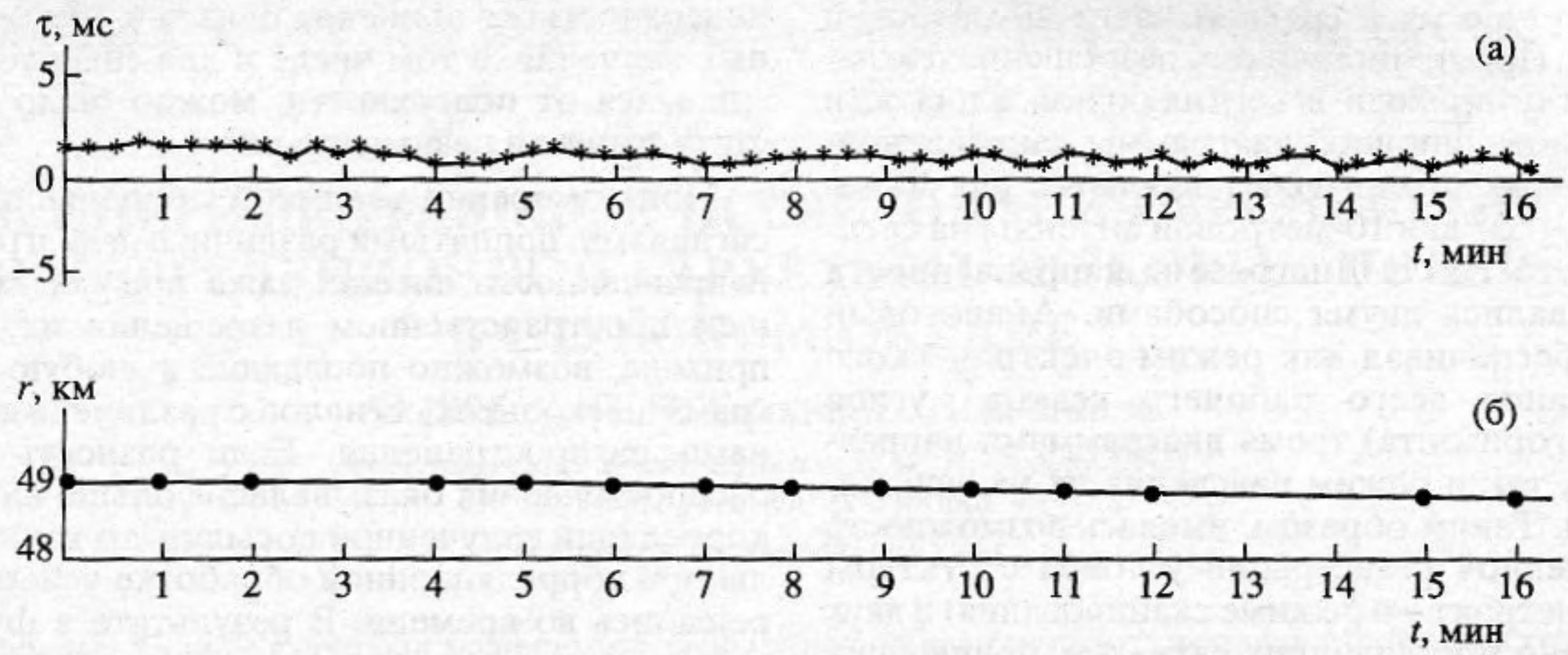

Рис. 1. Изменчивость временнóго спектра (а) и дистанции (б) при однолучевом приеме водных сигналов в 1-й зоне конвергенции (Атлантический океан; углы прихода сигналов $\alpha_1 = -2°$ и $\alpha_2 = -6°$ – знак минус указывает на приход сигналов снизу; глубина излучения – 200 м, глубина приема – 190 м).

среднеквадратичных флуктуаций времени распространения $\sigma_\tau \leq 0.03$ мс в случае малых неоднородностей с размерами a = 1.5 - 1.9 м ($\langle\mu^2\rangle$ = = (16 - 22) × 10^{-10}) и $\sigma_\tau \leq 0.78$ мс при наличии крупных неоднородностей с a = 110 - 115 м ($\langle\mu^2\rangle$ = = (100 - 270) × 10^{-10}) [3]. В реальной среде из-за вертикальной рефракции неоднородности обычно встречаются не на всей длине трассы распространения сигналов и поэтому экспериментальные значения флуктуаций времени распространения, обусловленные этими неоднородностями, должны быть меньше указанных величин. По этим же причинам следует ожидать больших коэффициентов корреляции между сигналами, приходящими в точку приема разными путями.

Описываемые ниже эксперименты проводились в различных гидрологических условиях. Большая часть опытов была поставлена при вертикальном профиле скорости звука $c(z)$, типичном для подводного звукового канала (ось ПЗК обычно находилась на глубинах 800 - 1200 м). Во время экспериментов сила ветра изменялась от 5 до 11.5 м/с, что соответствует развитому ветровому волнению со среднеквадратичной высотой от 0.1 до 0.8 м. Глубины источника излучения и приемной антенны (ее центрального приемника) выбирались из условия существования в точке приема сигналов, распространяющихся как водным путем, так и с отражением от поверхности океана. В разных опытах глубины источника менялись от 120 м до 300 м, глубины приема – от 150 м до 1420 м.

Примером однолучевого приема сигнала каждой из выбранных диаграмм направленности может служить временной спектр, приведенный на рис. 1а. По оси абсцисс отложено время наблюдения t в минутах, по оси ординат – разность времен распространения τ сигналов с углами прихода α_1 и α_2. Наличие в спектре только одной составляющей обусловлено полным пространственным разрешением сигналов, приходящих с каждого из двух направлений (Атлантический океан, 1-я зона конвергенции, дистанция – 49 км; углы прихода $\alpha_1 = -2°$, $\alpha_2 = -6°$, глубина приема – 190 м, глубина излучения – 200 м). На рис. 1б представлена зависимость от времени дистанции r между излучателем и приемной антенной. Среднее значение единственной составляющей временнóго спектра равно $\bar{\tau}$ = 1.23 мс. Такая задержка во времени прихода сигнала сохранялась в течение всего времени наблюдения, несмотря на медленное изменение дистанции между излучающей и приемной системой (на рис. 1б изменение r составляет ~ 70 м). Флуктуации разности времен прихода характеризуются среднеквадратичным отклонением, вычисленным по методу наименьших квадратов, равным σ_τ = 0.24 мс. Величина коэффициента взаимной корреляции принятых псевдошумовых сигналов равна $|\bar{R}|$ = 0.92 при среднеквадратичном значении его флуктуаций σ_R = 0.05. Полученные величины являются характерными для глубокого океана, когда осуществляется однолучевой прием сигналов, распространяющихся без отражений от поверхности и дна [4, 5]. Большая величина коэффициента корреляции указывает на идентичность спектров сигналов, распространяющихся разными путями по водным лучам. Малые значения флуктуаций временных спектров говорят об их стабильности во времени. Следовательно, случайные неоднородности в толще воды не привели к заметным отличиям в характеристиках сигналов, что согласуется с теоретическими оценками.

Приведенный вывод о слабом влиянии неоднородностей водной толщи на флуктуационные характеристики сигналов дает основание ожидать аналогичных результатов при приеме сигналов, распространяющихся по чисто водным лучам, и в том случае, когда точки приема разнесены по глубине. Примером изменчивости временнóго спектра при разногоризонтном приеме может служить рис. 2. Сигнал с углом прихода $\alpha_1 = 0.5°$ принимался на глубине 200 м 40-метровой антенной, а сигнал с углом прихода $\alpha_2 = 7.5°$ – одновременно на глубине 1100 м 10-метровой глубоководной антенной. Глубина излучения равнялась 200 м. На рис. 2а изображена изменчивость временнóго спектра в течение 11 мин, на рис. 2б – изменение дистанции за то же вре́мя (Индийский океан, 1-я зона конвергенции, дистанция – 64 км). Неполное разрешение принимавшихся сигналов по углу прихода привело к наличию нескольких составляющих во временнóм спектре. Две из этих составляющих – 1-я и 2-я, характеризуются наибольшими коэффициентами корреляции. Для 1-й составляющей средняя за время наблюдения величина коэффициента взаимной корреляции принимаемых сигналов равна $|\bar{R}| = 0.44$, а для 2-й составляющей – $|\bar{R}| = 0.36$. Несмотря на незначительный рост дистанции (300 м за 11 мин), величины временны́х задержек в начале и конце наблюдения заметно изменились (на 14 мс), причем это изменение происходило довольно плавно. Такое поведение временнóго спектра с ростом дистанции при приеме сигналов на разных горизонтах (разность в горизонтах составляет 900 м) обусловлено большим различием производных dT/dr для выбранных горизонтов приема (T – время распространения, r – дистанция). Флуктуации составляющих временнóго спектра, оцененные как среднеквадратичные отклонения по методу наименьших квадратов при оптимальной аппроксимации представленных зависимостей, равны: для 1 – $\sigma_\tau = 0.15$ мс, для 2 – $\sigma_\tau = 0.20$ мс.

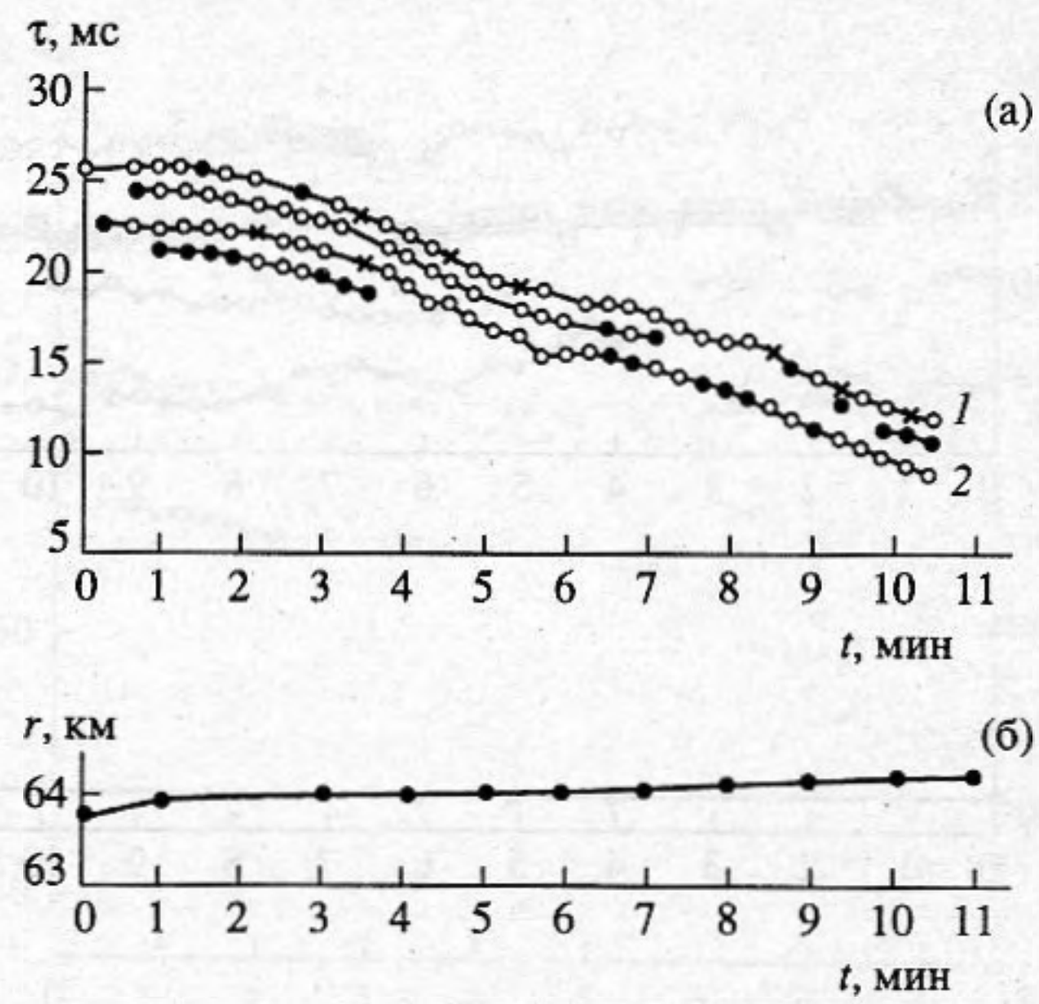

Рис. 2. Изменчивость временного спектра (а) и дистанции (б) при многолучевом приеме водных сигналов на разных горизонтах (Индийский океан, 1-я зона конвергенции; глубина излучения – 200 м; углы прихода сигналов $\alpha_1 = 0.5°$ на глубине 200 м и $\alpha_2 = 7.5°$ на глубине 1100 м).

Большой интерес представляют данные о величинах и флуктуациях коэффициентов корреляции и стабильности временны́х спектров в тех случаях, когда сигналы отражаются от границ океана, в первую очередь от взволнованной поверхности. При этом происходит не только ослабление сигналов, но и изменяется их частотный спектр, что должно приводить к дополнительной раскорреляции сигналов, приходящих в точку приема разными путями. На рис. 3а приведен пример изменения временнóго спектра в течение 22 мин при многолучевом приеме сигналов, один из которых распространяется водным путем, а другой – с отражением от поверхности; на рис. 3б – изменение дистанции между точками излучения и приема. Сигналы с углами прихода $\alpha_1 = 8°$ (водные лучи) и $\alpha_2 = -15°$ (с отражением от поверхности) были приняты во 2-й зоне конвергенции (Тихий океан; глубина излучения – 200 м, глубина приема – 300 м). Неполное пространственное разрешение пришедших на антенну лучей привело к появлению четырех составляющих во временнóм спектре. Две – 1-я и 2-я – имеют наибольшие коэффициенты взаимной корреляции: средняя величина коэффициента корреляции $|\bar{R}|$ 0.58 и 0.45 соответственно. Максимальные коэффициенты корреляции (на рисунке они обозначены квадратиками) в каждой отдельной реализации временнóго спектра принадлежат то 1-й, то 2-й составляющей рассматриваемого спектра. Такой перескок максимумов корреляции, определивший относительно большие значения флуктуаций ($\sigma_R = 0.11$ и 0.10) связан с изменением соотношения интенсивностей сигналов, приходящих по отдельным лучам. Вероятнее всего, такое перераспределение обусловлено сигналами, распространяющимися с отражением от поверхности океана (скорость ветра – 9 м/с, среднеквадратичная высота волны – $\sigma = 0.42$ м, полоса частот – 0.8 - 1.5 кГц, параметр Рэлея $P = 0.68$ для угла скольжения у поверхности около 10°, соответствующего углу на горизонте приема $\alpha_2 = -15°$). Однако, несмотря на значительные флуктуации величин коэффициентов корреляции, сам временнóй спектр оказался относительно стабильным. Так для 1-й составляющей со средним значением временнóй задержки $\bar{\tau} = 33.4$ мс среднеквадратичное отклонение равно $\sigma_\tau = 0.46$ мс, а для 2-й составляющей

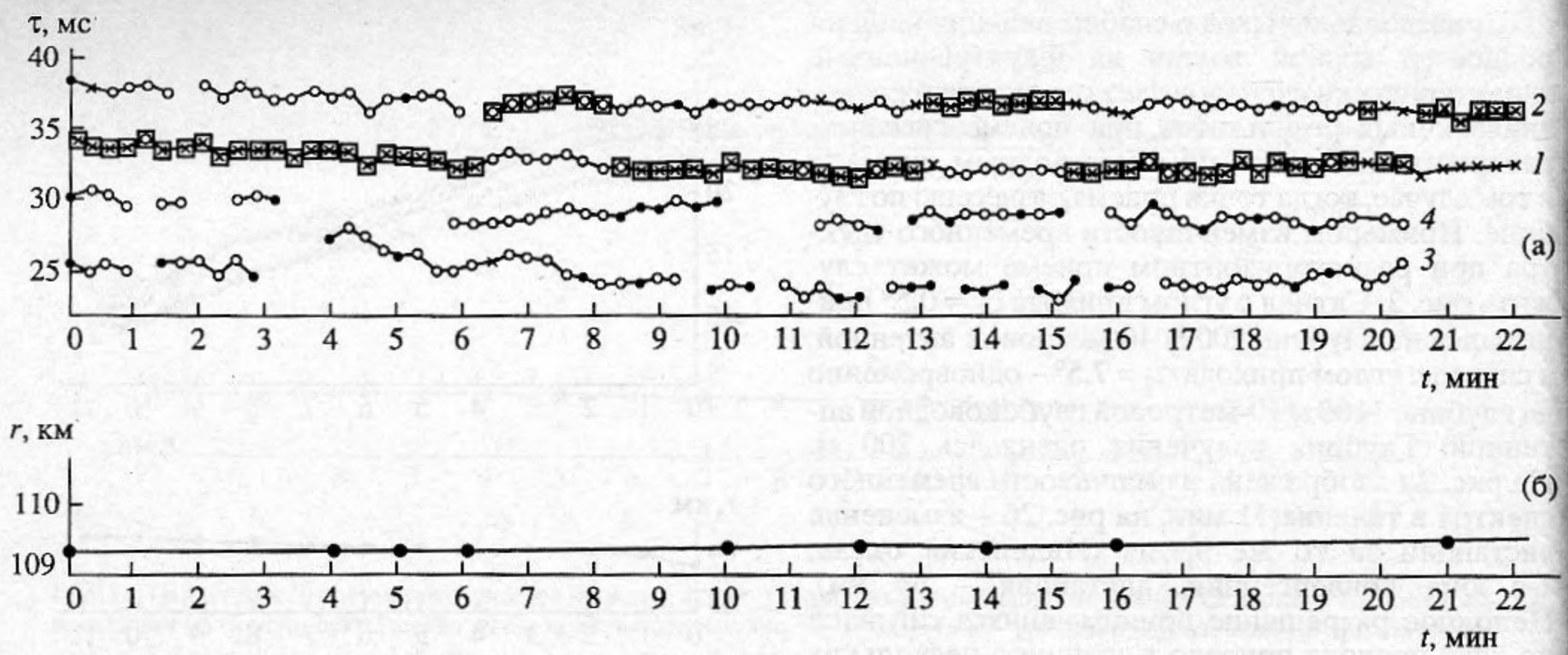

Рис. 3. Изменчивость временнóго спектра (а) и дистанции (б) при многолучевом приеме водных и отраженных от поверхности сигналов (Тихий океан, 2-я зона конвергенции; глубина излучения – 200 м, глубина приема – 300 м; углы прихода сигналов $\alpha_1 = 8°$ и $\alpha_2 = -15°$).

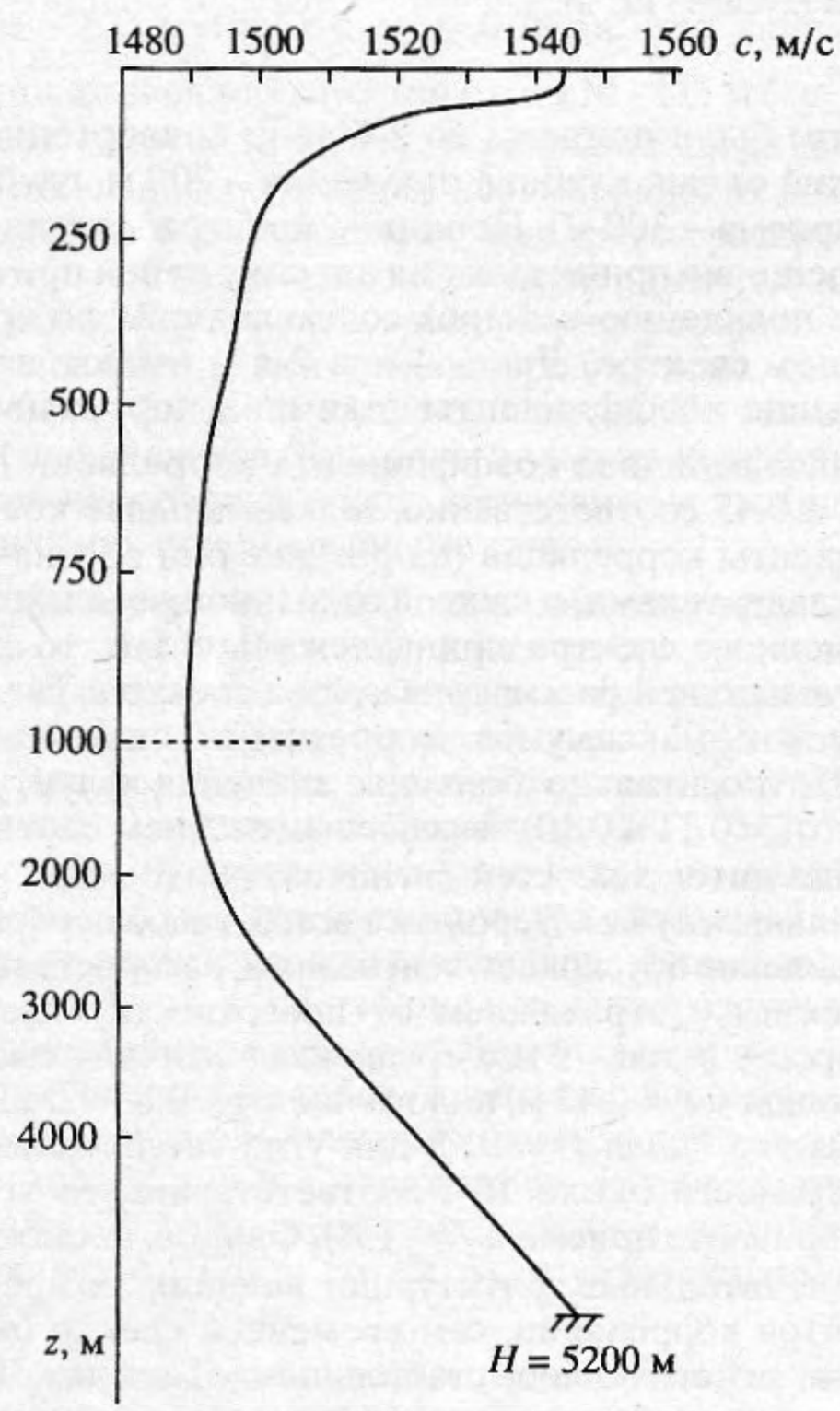

Рис. 4. Зависимость скорости звука от глубины (Индийский океан).

с $\bar{\tau} = 37.7$ мс – $\sigma_\tau = 0.40$ мс. Заметим, что сигнал, приходящий в точку приема под углом $\alpha_2 = -15°$, испытывает от одного до двух отражений от поверхности в зависимости от знака угла выхода из источника.

Наличие нескольких составляющих во временнóм спектре особенно характерно для распространения сигналов на большие дистанции. Приведем пример изменчивости временнóго спектра для сигналов, принятых в Индийском океане на дистанции ~700 км в 12-й зоне конвергенции. Полоса излучаемого на глубине 200 м сигнала была 0.5 - 1.0 кГц. Пространственное разрешение 40-метровой приемной антенны на средней частоте 0.75 кГц составляло 2.5°. Профиль скорости звука $c(z)$, изображенный на рис. 4, характеризовался наличием подводного звукового канала с осью на глубине ~1200 м. При данном профиле $c(z)$ в угловой структуре поля на глубине приема ~300 м наблюдались два четко выраженных направления прихода сигналов с углами ±11°, соответствующих водным лучам. Изменчивость временнóго спектра для указанных сигналов регистрировалась в течение 44 мин. На рис. 5 показано изменение временнóго спектра для последних 9 мин наблюдения. Как видим, в спектре прослеживается три составляющих. Медленные уходы их средних значений связаны с изменением дистанции между точками излучения и приема. Среднеквадратичные флуктуации σ_τ 1, 2 и 3-й составляющих временнóго спектра, оцененные по методу наименьших квадратов при оптимальной аппроксимации приведенных зависимостей, равны

соответственно 0.50 мс, 0.58 мс и 0.56 мс. Средние значения коэффициентов взаимной корреляции (за время наблюдения 44 мин) оказались равными $|\bar{R}| = 0.38$ при $\sigma_R = 0.10$ – для 1-й составляющей, $|\bar{R}| = 0.36$ при $\sigma_R = 0.08$ – для 2-й составляющей и $|\bar{R}| = 0.25$ при $\sigma_R = 0.04$ – для 3-й составляющей.

На основании анализа экспериментально полученных данных можно сделать следующие выводы. Опыты, проведенные в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах, показали, что не только на малых дистанциях (~50 км), но и на дистанции ~700 км звуковое поле имеет четко выраженную временну́ю структуру.

Для водных лучей от 1-й до 2-й зоны конвергенции (50 - 700 км) флуктуации временны́х спектров не превышают $\sigma_\tau \leq 0.7$ мс, т.е. лежат в пределах, определяемых влиянием неоднородностей океанической среды и инструментальной точностью измерений. Близкие по величине флуктуации ($\sigma_\tau \leq 0.5$ мс) на дистанции до 200 км получены и при разнесенном по глубине приеме (разница в глубинах приемных систем – до 1220 м).

Для сигналов, один из которых распространяется водным путем, а другой – с отражением от взволнованной поверхности океана, на дистанциях, соответствующих первым трем зонам конвергенции, получены значения флуктуаций временно́го спектра от 0.2 мс до 0.7 мс при значениях параметра Рэлея от 0.24 до 1.7 (количество отражений от поверхности от одного до четырех).

Таким образом, стабильность временны́х спектров для сигналов, распространяющихся по водным или отраженным от поверхности лучам и принятых как на одном, так и на разных горизонтах, весьма высока и флуктуации временны́х задержек не превышают теоретических оценок, связанных с учетом неоднородностей среды.

Значения коэффициентов взаимной корреляции сигналов, принятых по́д различными углами в вертикальной плоскости, при однолучевом приеме водных лучей в 1-й - 3-й зонах конвергенции лежат в пределах 0.85 - 0.98. Такие большие значения коэффициента корреляции являются следствием практической идентичности частотных спектров сигналов, распространяющихся водным путем. При многолучевом приеме вычислялся суммарный коэффициент корреляции R_Σ для всех сигналов, которые не удалось разрешить с помощью имеющихся диаграмм направленности. Для водных лучей коэффициент корреляции R_Σ в 1-й - 7-й зонах конвергенции (50 - 420 км) меняется в пределах от 0.7 до 0.8 и не зависит ни от номера зоны, ни от конкретного района океана. В 12-й зоне конвергенции (~700 км) из-за снижения отношения сигнал/помеха R_Σ получился равным 0.6.

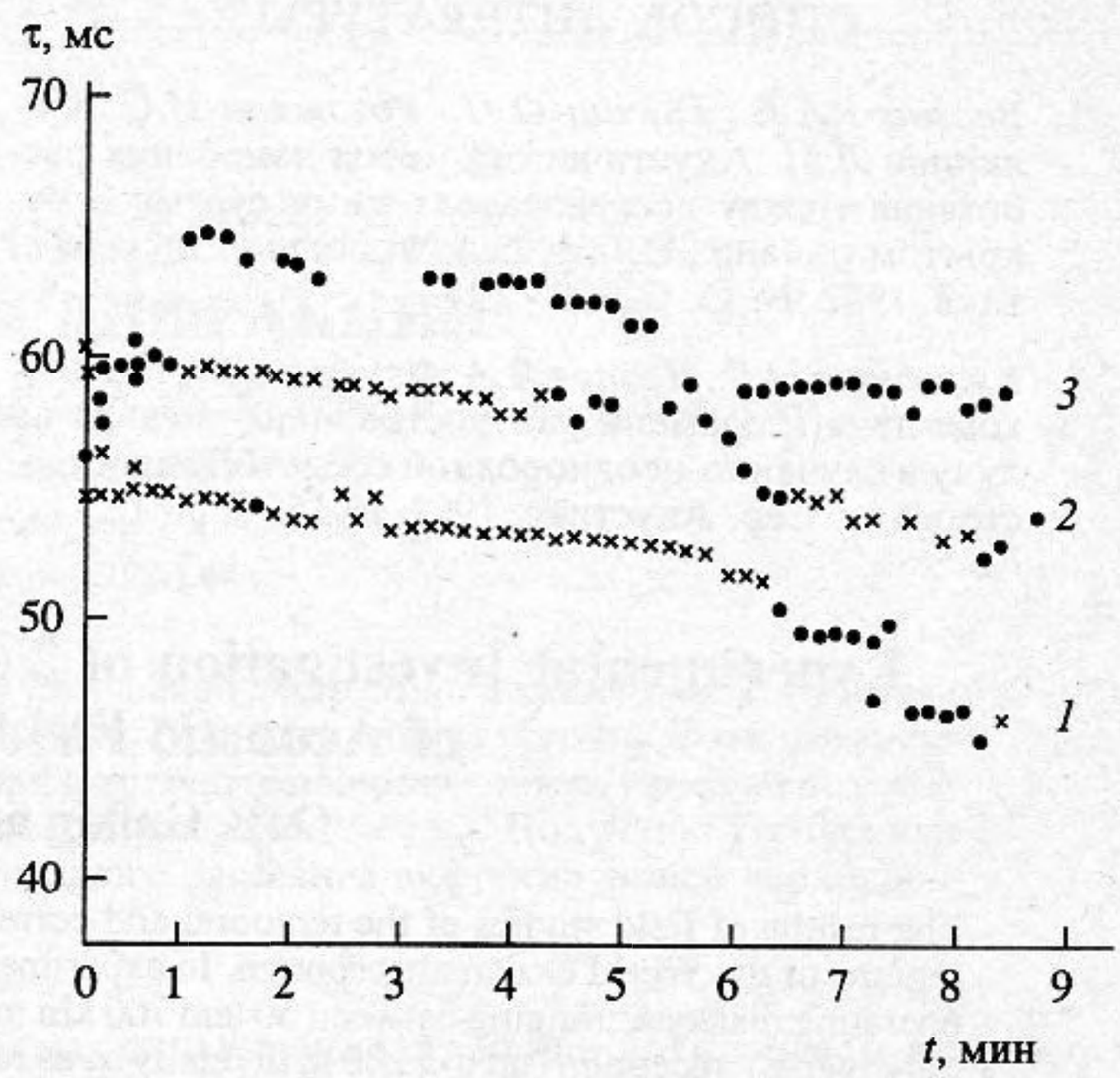

Рис. 5. Изменчивость временно́го спектра при многолучевом приеме водных сигналов (Индийский океан, 12-я зона конвергенции; глубина излучения – 200 м, глубина приема – 308 м, углы́ прихода сигналов $\alpha_1 = 11°$ и $\alpha_2 = -11°$).

Суммарный коэффициент корреляции между сигналами, один из которых распространяется водным путем, а другой – с отражением от поверхности, колеблется в пределах от 0.62 до 0.73 для дистанций, соответствующих первым трем зонам конвергенции. Для относительно узкополосных сигналов (с полосой частот 0.8 - 1.5 кГц) он практически не зависит ни от параметра Рэлея (для $P = 0.24$ - 1.7), ни от количества отражений (в экспериментах – от одного до четырех), хотя амплитуда отраженных от поверхности сигналов при каждом отражении, естественно, заметно уменьшается, особенно при больших значениях параметра Рэлея.

Таким образом, неоднородности водной толщи и поверхностное волнение в рассмотренных ситуациях не приводят к существенным флуктуациям времен рапространения и раскорелляции сигналов при использовании направленного в вертикальной плоскости приема. При переходе к мелководным районам океана кроме рассмотренных причин, изменяющих характеристики сигналов, добавляется влияние рельефа дна, его структуры и акустических характеристик, что требует специальных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 94-02-04149а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веденеев А.Е., Галкин О.П., Рогожкин И.С., Филиппов Л.М.* Акустический метод измерения расстояния между исследовательскими судами в открытом океане // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1982. № 15. С. 122 - 125.
2. *Кузнецова Н.Г., Чернов Л.А.* Флуктуации угла прихода луча и времени распространения сигнала по лучу в случайно-неоднородной среде // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1982. № 15. С. 5 - 13.
3. Акустика океана / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. С. 72.
4. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Влияние неоднородностей океанической среды на взаимнокорреляционную функцию принятых сигналов // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1982. № 15. С. 13 - 17.
5. *Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А., Панкова С.Д., Дымшиц А.М.* Исследования "толщины" физических лучей в океане и влияния среды на корреляционные свойства сигналов // Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 118 - 133.

Experimental Investigation of Temporal and Correlation Structure of Acoustic Fields in a Deep Ocean

O. P. Galkin and S. D. Pankova

The results of field studies of the temporal and correlation structures of acoustic fields in various deep water regions of the World Ocean are reported. In experiments, 0.5 - 4.0 kHz pseudonoise signals were radiated over operating distances ranging between 50 and 700 km to vertical-plane narrow beam antennas. Simultaneous spatial diversity reception (up to 1200 m diversity) was realized with two directional reception antennas. Temporal and correlation characters for signals that were propagated through water paths and suffered reflections from a rough ocean surface were studied.